

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

PCT/JP 2004/014302

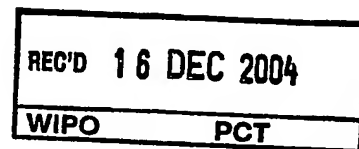
22. 9. 2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2003年 9月26日

出願番号
Application Number: 特願2003-335207
[ST. 10/C]: [JP 2003-335207]



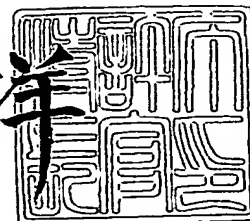
出願人
Applicant(s): 日本電信電話株式会社
学校法人北里学園

PRIORITY
DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2004年12月 2日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小川 洋



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2004-3097487

【書類名】 特許願
【整理番号】 NTTH156079
【特記事項】 特許法第30条第1項の規定の適用を受けようとする特許出願
【提出日】 平成15年 9月26日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 H01S 3/18
【発明者】
 【住所又は居所】 千葉県佐倉市染井野2丁目23番9号
 【氏名】 大林 康二
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都武蔵野市西久保1丁目44番5号
 【氏名】 清水 公也
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都多摩市落合5丁目8番20号棟102号室
 【氏名】 天野 卓治
【発明者】
 【住所又は居所】 神奈川県相模原市御園4丁目14番地18号 オーシャンハイム
 202号室
 【氏名】 廣岡 秀明
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都練馬区早宮1丁目30番地10号
 【氏名】 崔 東学
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都八王子市下柚木1432番地
 【氏名】 古川 裕之
【発明者】
 【住所又は居所】 神奈川県相模原市陽光台4丁目21番7号
 【氏名】 中西 基
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 狩野 文良
【発明者】
 【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
 【氏名】 宮澤 丈夫
【特許出願人】
 【識別番号】 000004226
 【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社
【特許出願人】
 【識別番号】 592048877
 【氏名又は名称】 清水 公也
【特許出願人】
 【識別番号】 502422432
 【氏名又は名称】 大林 康二
【代理人】
 【識別番号】 100078499
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 光石 俊郎
 【電話番号】 03-3583-7058

【選任した代理人】

【識別番号】 100102945

【弁理士】

【氏名又は名称】 田中 康幸

【電話番号】 03-3583-7058

【選任した代理人】

【識別番号】 100120673

【弁理士】

【氏名又は名称】 松元 洋

【電話番号】 03-3583-7058

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 020318

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 特許請求の範囲 1

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上且つ出射光の周波数幅が 13 GHz 以下の可変波長光発生装置であって、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔且つ $530 \mu\text{s}$ 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置。

【請求項 2】

可変波長光源と、前記可変波長光源の出力光を第一の光線と第二の光線に分割する手段と、第一の光線を測定対象に照射する手段と、前記測定対象によって反射された第一の光線と第二の光線を合波する手段と、前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光源の波数毎に測定する手段と、前記測定する手段によって前記波数毎に得られる前記出力光の強度の集合から第一の光線が測定対象によって反射された位置を前記測定対象の深さ方向に対して特定する手段とを有する光干渉トモグラフィ装置の前記可変波長光源として使用される可変波長発生装置であって、

分解能が $80 \mu\text{m}$ 以下になるように波数の可変範囲の幅を広くし、測定範囲が 10 mm 以上になるように出射光の周波数幅及び波数間隔を狭くし、

且つ、前記分解能を速度 1 mm/s で除した第一の値を前記可変範囲の幅を前記波数間隔で除した第二の値で除して得られる時間以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置。

【請求項 3】

前記可変波長光発生装置を構成する発光素子として超周期構造回折格子分布反射型半導体レーザを用いたことを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置。

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 の何れか 1 項に記載の光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置と、前記可変波長光発生装置の出力光を第一の光線と第二の光線に分割する手段と、第一の光線を測定対象に照射する手段と、前記測定対象によって反射された第一の光線と第二の光線を合波する手段と、前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光発生装置の波数毎に測定する手段と、前記測定する手段によって前記波数毎に得られる前記出力光の強度の集合から第一の光線が測定対象によって反射された位置を前記測定対象の深さ方向に対して特定する手段とを有する光干渉トモグラフィ装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置及び光干渉トモグラフィ装置

【技術分野】

【0001】

この発明は、光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置及び光干渉トモグラフィ装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

(1) 光干渉トモグラフィ (OCT)

低コヒーレント光を利用した光干渉トモグラフィ (Optical Coherence Tomography; OCT) は、生体の表面近傍の断層像を数十 μm 程度の分解能で観察可能にする新しい医療計測技術である。OCT は既に眼組織の臨床観察で実用化されており、眼組織の病変 (例えば、網膜はく離) の断層観察を顕微鏡の精度で可能にしている (非特許文献 1)。この技術の臨床応用は緒についたばかりであるが、内視鏡と組み合わせた生体内部の断層観察への展開等、今後の発展が期待されている。

現時点で実用化されている OCT は、OCDR (Optical Coherence Domain Reflectometry) - OCT と呼ばれる機械的走査を必要とする測定技術である。一方、機械的走査を必要としない OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) - OCT と呼ばれる技術が、最近研究され始めている。以下、それぞれの技術について説明する。

【0003】

(2) OCDR-OCT

OCDR-OCT の測定原理は、図 7 のように試料 (生体) 1 に測定光 2 を照射しその光が試料 1 の内部の組織境界面 3 で反射され再び試料 1 の外に出射するまでに通過する光路長を、低コヒーレント光源を光源とするマイケルソン干渉計によって測定するものである。即ち、図 7 に示すように、試料 1 に入射した光 2 は、組織境界面 3 の屈折率変化によってその一部が反射され試料 1 の外に再出射される。この再出射された光 4 が通過して来た光路長を測定することにより、試料 1 の内部の深さ方向の構造を知ることができる (深さの基準点である試料 1 の表面の位置は、表面反射光によって与えられる)。従って、測定光 2 の入射位置を試料 1 の表面に対して走査することにより、試料 1 の内部の断面像や三次元像を得ることができる。

【0004】

図 8 は、OCDR-OCT 装置の概略図である。図 8 に示すように、光源 5 としては通常スーパー・ルミネッセンス・ダイオード (SLD) が用いられ、その放出光はマイケルソン干渉計 6 に入射される。この光はビームスプリッタ 7 によって分割され、一方は細いビーム状に収束され試料 1 に照射させる。分割されたもう一方の光は、参照光ミラー 8 に照射される。それぞれの光は、試料 1 および参照光ミラー 8 によって反射されビームスプリッタ 7 によって合波された後、光検出器 9 に入射する。SLD は波長スペクトル幅が $\sim 20\text{nm}$ と広いので、その出射光のコヒーレント長は数十 μm と短い (例えば、中心波長 850nm 、波長幅 20nm の SLD 光のコヒーレント長は、 $15\mu\text{m}$ である)。このため参照光 10 と信号光 11 の光路長がこの短いコヒーレント長の範囲内にある場合にだけ、両者は干渉する。即ち参照光ミラー 8 を参照光 10 の光軸方向に走査すると、光検出器 9 の出力は参照光 10 と信号光 11 の光路長が一致した付近 14 のみで、図 9 (縦軸 12 は光検出器 9 の出力、横軸 13 は参照光ミラー 8 の移動距離) のように、コヒーレント長程度の幅を有する干渉パターン 15 (以下、「コヒーレント干渉波形」と呼ぶ。) を示す。このコヒーレント干渉波形 15 の現れる参照光ミラー 8 の位置から、信号光 11 の光路長を直接知ることができる。

この方法の分解能は、使用する光源のコヒーレント長で決まり、通常 $10\sim 15\mu\text{m}$ 程度である。また、一回の測定に要する時間は、参照光ミラー 8 の走査に必要な時間で決まり、通常は速くても 1 秒程度である (非特許文献 1)。

【0005】

(3) 光周波数域コヒーレント干渉法 (OFDR-OCT)

OCDR-OCTには、参照光ミラー8の機械的走査が必須であるため機械的振動の発生が不可避であり又測定中は試料(生体)を制止しておかなければならない等の課題がある。このため比較的制止の容易な眼組織の断面観察以外への適用は容易ではない。

参照光ミラー8の走査を不要とする試みとして、図10のようにマイケルソン干渉計の出力側にグレーティング21とCCD16を配置し、参照光ミラー8を固定したままで出力光の分光特性をCCD16で測定し、その結果からコヒーレント波形を計算・構築する光周波数域コヒーレント干渉法(Optical Frequency Domain Reflectometry; 以下、OFDR-OCTと呼ぶ)が提案されている(非特許文献2)。

【0006】

OFDR-OCTの原理は以下のようなものである。まず、横長に集光した測定光18を試料1の表面17に照射する一方、参照光ミラー8を紙面に垂直な方向に傾けてCCD16面上での参照光11の光路差が紙面に垂直な方向で漸次変化するように設定する。この様な状態で、信号光10と参照光11を合波してCCD16画面上に結像させる。この時CCD16面上には、図11のようなフリンジ(空間的な干渉模様)22が発生する(y軸は測定光の長手方向の位置を、x軸は測定光の周波数 ω を表す。)。次にCCD16によってy軸方向に沿って(x座標は一定)フリンジの強度を観測し計算機でそのパターンを解析すると、周波数(波長)毎に出力光の電界振幅及びその位相を算出することができる。この様にして求めた周波数に対する出力光の振幅及び位相を表す関数(以下、「スペクトル密度関数」と呼ぶ)を、フーリエ変換してコヒーレント干渉波形を構築する。なお、測定光等の集束/結像は、x'軸方向のみに集光する2つのシリンドリカルレンズ19とy'軸方向にのみ集光する一つのシリンドリカルレンズ20によって行われる。

OFDR-OCTでは参照光ミラー8の移動が不要なため測定時間が短く、150ms程度の短時間観測の例も報告されている。しかしながら、この方法には、以下のような問題点もある。

【0007】

(問題点1) 水平方向の分解能が低い(水平分解能; 100 μ m程度)。

スペクトル密度関数を算出する際、試料内部で反射面は一定の深さに広がっていると仮定して計算処理するので、反射面の深さが水平方向(y'軸方向)に対して急激に変化する試料では正確なスペクトル密度関数が得られない。従って、試料の表面に水平な方向(y'軸方向)での分解能は高くなく、100 μ m程度の値が報告されるのみである。

【0008】

(問題点2) 深さ方向の測定範囲が狭い(測定範囲; ± 6.0 mm)。

深さ方向の測定可能範囲 L_m は、CCDで検出する各周波数成分に対するコヒーレント長で決まる。各周波数成分におけるスペクトル幅を Δf 、 c を光速とすると、測定可能範囲 L_m は式(1)で与えられる(非特許文献2中に記載の式による。)

【0009】

【数1】

$$L_m = \frac{c}{\Delta f} \quad \dots\dots\dots (1)$$

【0010】

OFDR-OCTでは、 Δf は周波数軸方向(x軸)の<CCDのピクセル幅>に依存する。コヒーレント長34 μ mのSLDを光源とし、周波数軸方向のピクセル数が640、ピクセル間隔が13.3 μ mのCCDを用いた場合、式(1)より計算される測定範囲は ± 9.0 mmとなる(非特許文献2)。しかし、y軸上で零から離れるほどビームスプリッタ7で分割された後の信号光10と参照光11の光路長の差(optical path difference; OPD)が大きくなり、このため、フリンジ周期がCCD

のピクセル幅に近くなりフリンジの平均化が起こる。その結果 S/N が低下し、明瞭なコヒーレント干渉波形が構築できる範囲は OPD が $\pm 6.0\text{ mm}$ の範囲までである。

【0011】

参照光ミラー 8 の移動距離によって測定範囲が決まるため原理的には測定範囲に制限のない $OCDR-OCT$ であっても、生体組織による光散乱のため測定範囲が表面から数 mm の深さまでに限られている事実を考慮すると、測定範囲 $\pm 6.0\text{ mm}$ という値は十分なようにも思われる。しかし、この値 ($\pm 6.0\text{ mm}$) は、試料表面で OPD が零になるように参照光ミラー 8 の位置を調節した後に得られる値であることに注意しなければならない。即ち、 $OFDR-OCT$ では、測定のために参照光ミラー 8 の位置を調整して、試料表面の OPD を零に設定しなければならない。測定範囲が $\pm 6.0\text{ mm}$ であることから明らかのように、参照光ミラー 8 の位置の調整には 1 mm 程度の精度が要求される。従って $OFDR-OCT$ による測定では、測定点を変えるたびに精密な参照光ミラー 8 の位置合わせが必要になり、測定手順が煩雑になる。なお、 $OCDR-OCT$ であっても、測定点を変えるたびに精密な参照光ミラー 8 の位置合わせが必要なことには変わりがない。これは、干渉信号を長距離に亘って測定するには、長い測定時間が必要になるからである。

【0012】

【特許文献 1】特開平 6-53616 号公報

【特許文献 2】特開平 6-61578 号公報

【特許文献 3】United States Patent 4,896,325

【非特許文献 1】陳建培 OPTRONICS (2002) NO7, 179

【非特許文献 2】寺村友一、末国雅行、神成文彦; Proceeding of 23rd Meeting on Lightave Sensing Technology, p39)

【非特許文献 3】Handbook of Optical Coherence Tomography (edited by Brett E. Bouma, Guillermo J. Tearney)

【非特許文献 4】応用物理: 第 71 巻、第 11 号、p1362 吉國祐三

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

眼底測定で $OCDR-OCT$ の実用化が可能であった理由には、測定対象の制止が比較的容易であったということが挙げられる。しかし、生体には消化管のぜん動など制止困難な運動を伴う部分が数多くある。このような部分の観測には、従来の OCT ($OCDR-OCT$ 及び $OFDR-OCT$ 双方) による断層観察は適していない。

例えば数 $\text{mm}/\text{秒}$ の速さで動く部分を $OCDR-OCT$ で観察をする場合、測定時間中 (約 1 秒) に観察対象の移動する距離 (数 mm) が分解能 (数十 μm) に比べ著しく大きくなるため断層像の撮影は不可能である。

$OCDR-OCT$ に比べ $OFDR-OCT$ による断層撮影は高速であるが、現在得られている測定時間 (150 msec) は上記のような部分の測定にはまだ不十分である。これは、コヒーレント干渉波形を構築する過程が複雑なため計算機処理に時間がかかるためである。即ち、現在の OCT には、制止困難な生体部分の観察には適したものがないという課題がある。更に、上記の通り水平方向の分解能が低く又深さ方向の測定範囲も狭いという問題点もある。

【0014】

本発明の目的は上記課題を解決し、制止困難な生体部分の断層観察を可能にする OCT 技術を提供することである。また、制止可能な部分の観察に対しても、制止を不要とし生体への負担を無くした断層観察技術を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0015】

(1) 本発明の第一の手段

上記課題を解決するための第一の手段は、＜波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上且つ出射光の周波数幅が 13GHz 以下の可変波長光発生装置であって、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔且つ $530 \mu\text{s}$ 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する可変波長光発生装置を光干渉トモグラフィ用の光源＞として用いることである。光干渉トモグラフィ用の光源として、この可変波長光源（可変波長光発生装置）を用いることによって、制止困難な生体部分の断層観察が可能になる。

【0016】

(イ) 「波数を階段状に切り替え可能な手段を有する」ことによる効果

従来の OCT では、SLD が出射する広帯域（低コヒーレント）直流光（CW 光）を測定光として用い、OCDR-OCT では干渉パターン（図 9）を、OFDR-OCT ではフリンジ（図 11）を測定していた。一方、本発明の構成要件「波数を階段状に切り替え可能な手段を有する」によれば、測定に用いる光源の波数を例えば図 1 のように少しずつ階段状に変えて、各波数における干渉計の応答を測定することが可能になる。この特徴によって、以下に述べる通り断層撮影の高速化と水平方向分解能の向上が図られる。

【0017】

なお、図 1 では、波数が波数走査時間に対して漸増しているが、必ずしも漸増する必要は無く漸減する場合であっても何ら問題はない。また、必ずしも波数が漸次変化する必要はなく、測定時間内に所定の波数を総て走査できさえすれば良い。即ち、波数の変化は不規則なものであっても良い（測定後の計算機処理の過程で、波数を並び替えることが容易であるため）。ここで「所定の波数」とは、＜等間隔に並んだ波数の集合＞であることが望ましいが、必ずしもこれに限られるものではなく波数間隔が一定でない波数の集合であっても良い。波数間隔が一定ではない場合には、後に実施の形態例 1 で述べる断層像構築のための計算処理に対する一定の修正を必要とするが、この修正は波数走査の態様に応じフーリエ変換に関する知識を基礎として導くことができるものである。以上述べたとおり、「波数を階段状に切り替え可能な手段」とは、断層像の構築が可能であることを条件に波数間隔及び測定順番を制限するものではない。

また、波数の変化は離散的であることが望ましいが、一定時間特定の波数を保持できるものであればその変化は連続的であっても良い。

【0018】

本発明の測定過程には OCDR-OCT に必須の参照光ミラーの走査が不要であるため、OCDR-OCT より高速度で測定が可能である。

他方、本発明では、各波数における干渉計の出力光強度を束ねた分光特性（図 2）からコヒーレント干渉波形を構築するので、OFDR-OCT 測定のように強度情報と位相情報の双方を含むスペクトル密度関数を計算処理してコヒーレント干渉波形を構築する必要はない。このため本発明では、簡単な計算機処理によってコヒーレント干渉波形を構築することができる（但し、後に実施の形態例 1 で述べる通り $1/2$ 波長以内の誤差の生じる場合がある。）。また、スペクトル密度関数の算出自体が不要なので、従来の OFDR-OCT に比べデータ処理が短時間で済み高速測定が可能になる（なお、本発明で用いる計算処理については、実施の形態例 1 において説明する。）。

【0019】

また、スペクトル密度関数を算出するために従来型 OFDR-OCT の水平方向分解能を劣化させていた仮定（水平方向で深さ分布が一様）も本発明では不要であり、従って水平方向の分解能の劣化は存在しない。

即ち、本発明を用いて実施される断層撮影には参照光ミラー走査の様な機械的動作が介在せず、また後述する通り本発明を用いる断層撮影では簡単な手順でコヒーレント干渉波形が構築可能なので、断層撮影の高速化が可能である。また、本発明を用いて実施される断層撮影では、従来の OFDR-OCT の様な水平方向の分解能を劣化させる仮定も存在しないので水平方向分解能の劣化もない。

【0020】

(ロ) 波数範囲等を限定した効果

この様に本発明は断層撮影の高速化に適しているが、特に<波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上且つ出射光の周波数幅が 13 GHz 以下の可変波長光発生装置であって、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔且つ $530 \mu\text{s}$ 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する可変波長光発生装置>に、使用する可変波長光発生装置を限定することによって、分解能 $80 \mu\text{m}$ 及び測定範囲 10 mm を確保しつつ、 $1 \text{ mm}/\text{秒}$ 以下の速さで動く試料の観察が可能になる。即ち、上記第一の手段によれば、 $1 \text{ mm}/\text{秒}$ で動く制止困難な生体部分の観察が可能になる。以下に、この様な効果が奏される理由について述べる。

【0021】

測定中に試料が動くとき試料内部の反射面の位置も一定せず、反射面位置の計測値が不確かになる。試料の動きが激しい場合には位置計測自体が不可能になるが、そこまでに至らない場合であっても、一般に動きのある試料に対する分解能（以下、「動的分解能」という）は静止している試料に対する分解能（以下、「静的分解能」という）より劣る。従って、動的分解能 $80 \mu\text{m}$ を得るためには、 $80 \mu\text{m}$ の静的分解能をまず確保しておかなければならない。本願発明者は、後に実施の形態例1の「原理」で述べるとおり、静的分解能 ΔZ は、波数の可変範囲の幅を Wk とすると以下の式（2）によって規定されることを見出した（測定光を束ねた場合のスペクトル形状が、矩形の場合。以下同じ。）。

【0022】

【数2】

$$\Delta Z = \frac{3.79}{Wk} \dots\dots\dots (2)$$

【0023】

この式（2）から動的分解能 $80 \mu\text{m}$ を得るための前提として、波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上が必要であることが分かる。これは上記第一の手段の構成要件「波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上」に相当する。

ところで深さ方向の測定範囲は、各波数における測定光のコヒーレント長に依存する。従って、測定範囲は測定光の周波数幅 Δf によって制限される。測定範囲 L_m と周波数幅 Δf （半値全幅）の間には次の式（3）の関係が成り立つので、 10 mm の測定範囲を確保するためには出射光の周波数幅が 13 GHz 以下でなければならない。これは、上記第一の手段の構成要件「出射光の周波数幅が 13 GHz 以下の可変波長光発生装置であって」に相当する。

【0024】

【数3】

$$L_m = \frac{2c \ln 2}{\pi} \frac{1}{\Delta f} \dots\dots\dots (3)$$

【0025】

なお、この式（3）は、非特許文献3のp46の式（22）を変形したものである。

ここで c は光速を表す。なお、単一縦モードで発振する半導体LDでは、この様な値は容易に達成できる。

一方、後に実施の形態例1で述べるように、測定範囲 L_m は測定光の波数間隔 Δk によっても制限される。即ち、Nyquistの定理によれば、測定範囲 L_m は次の式（4）によって表される。

【0026】

【数4】

$$L_m = \frac{\pi}{\Delta k} \dots\dots\dots (4)$$

【0027】

この式(4)からは測定範囲10mmを得るためには、更に波数間隔を $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下に設定しなければならないことが分かる。これは、上記第一の手段の構成要件「 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔」に相当する。

上記要件の下、波数切替時間 t_h を以下に示す通り十分短くすることによって、測定範囲10mmを確保しつつ、1mm/秒の速さで動く試料を動的分解能80 μm で観察可能になる。波数切替時間に要求される条件は、以下の通りである。

試料の運動による分解能の劣化を防ごうとするならば、測定時間内に試料の移動する距離が静的分解能以下になるように測定時間 t_m を短くすれば良い(即ち、静的分解能以下のブレは許容することとする。)。この考え方にたてば、静的分解能を Δz 、試料の移動速度を v とすると、試料の運動による分解能の劣化を防ぐために必要な測定時間 t_m は以下の式(5)で表される。

【0028】

【数5】

$$t_m \leq \frac{\Delta z}{v} \quad \text{-----} \quad (5)$$

【0029】

ところで測定に用いる波数の総数は波数範囲 Wk を波数間隔 Δk で割ったものなので、測定時間 t_m と波数切替時間間隔 t_h との間には次式の関係がある。

【数6】

$$t_m = \frac{Wk}{\Delta k} \times t_h \quad \text{-----} \quad (6)$$

【0030】

従って、式(5)及び式(6)より試料の移動速度 v が1mm/sの試料を測定するためには、波数切替時間間隔 t_h は530 μs 以下でなければならないことが分かる。

これは、上記第一の手段の構成要件「530 μs 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段」に相当する。

【0031】

以上述べたことより明らかな様に、可変波長光発生装置を<波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上且つ出射光の周波数幅が13GHz以下の可変波長光発生装置であって、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔且つ530 μs 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する可変波長光発生装置>に限定することによって、分解能80 μm 及び測定範囲10mmを確保しつつ、1mm/秒の速さで動く試料の観察が可能になる。

なお、上記説明では波数走査は一回のみを想定しているが、このような場合であっても、試料に横長の測定光を照射しCCDを光検出器として用いることによって断層撮影が可能である。また、式(2)及び式(4)は、測定光を束ねた場合のスペクトル形状が矩形の場合に対する厳密な式である。しかし、スペクトル形状をガウシアン形状等別のものに変えても、分解能等は大きくは変わらず得られる効果も矩形の場合とほぼ同じである。

【0032】

(ハ) より好ましい波数範囲等

以上の説明から明らかなように、好ましい波数範囲等は、分解能、測定範囲、測定可能な試料の移動速度が決まれば式(2)～(6)によって自動的に決定される。分解能等の好ましい一例は上述の通りのものであるが、更に好ましい分解能・測定範囲・試料の移動速度は、それぞれで40 μm 以下・100mm以上・3mm/s以下である。最も好ましい値は、それぞれ20 μm 以下・1000mm以上・9mm/s以下である。従って、それぞれの要請に答える波数範囲等は、以下の通りになる。

【0033】

(a) 試料速度が1mm/s以下の場合

試料速度が 1 mm/s 以下の場合の波数間隔、周波数幅、可変波数幅、及び波数切替時間の組み合わせは以下の通りである。

【0034】

【表1】

波数間隔+周波数幅(横欄) vs 可変波数幅(縦欄)	$3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下 13GHz 以下	$3.1 \times 10^{-5} \mu\text{m}^{-1}$ 以下 1.3GHz 以下	$3.1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$ 以下 130MHz 以下
$4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上	530 μs 以下	53.0 μs 以下	5.30 μs 以下
$9.5 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上	133 μs 以下	13.3 μs 以下	1.33 μs 以下
$1.9 \times 10^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 以上	33.1 μs 以下	3.31 μs 以下	0.331 μs 以下

【0035】

【表1】において、横欄は、好ましい波数間隔と周波数幅を表し、縦欄は、好ましい可変波数幅を表す。

ここで、波数間隔と周波数幅の値、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下と 13GHz 以下、 $3.1 \times 10^{-5} \mu\text{m}^{-1}$ 以下と 1.3GHz 以下、 $3.1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$ 以下と 130MHz 以下は、それぞれ測定範囲、10mm 以上、100mm 以上、1000mm 以上に対応する。また、可変波数幅の値、 $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上、 $9.5 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上、 $1.9 \times 10^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 以上は、分解能、80 μm 以下、40 μm 以下、20 μm 以下に対応する。

ここで、測定範囲が 100mm 以上に対応する場合には、測定範囲が十分に広いので測定点を変えても参照光ミラーの位置合わせが不要になるという効果も奏される。

【0036】

(b) 試料速度が 3 mm/s 以下の場合

表1中の各波数切替時間を3分の1にすれば良い。

【0037】

(c) 試料速度が 9 mm/s 以下の場合

表1中の各波数切替時間を9分の1にすれば良い。

【0038】

(d) 一点に集束した測定光を試料表面で走査し断層撮影する場合

走査する測定点の数を n (例えば、 $n=10, 50, 100, 200, 400, 800$) 以上とする場合には、(a) ~ (c) に示した波数切替時間を n 分の1以下にすれば良い。

【0039】

上述の通り波数走査が一回でも断層像は得られるが、後述する実施の形態例1のようにマッハツェンダー型干渉計を用いる場合には、測定点の走査も必要である。走査点数としては、10点以上が望ましく、更には50点以上、100点以上、200点以上、400点以上、800点以上が好ましい。

【0040】

(二) 上記光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置は、上記(ロ)又は(ハ)に記載の「波数の可変範囲の幅」「周波数幅」を有し同じく上記(ロ)又は(ハ)に記載の「波数間隔」及び「時間間隔」で階段状に波数を切替可能な可変波長発光素子とその制御回路とで構成されることが好ましい。そして、上記制御回路は、上記「波数の可変範囲の幅」「周波数幅」「波数間隔」、及び「時間間隔」で、上記可変波長発光素子の出力光の波数を階段状に切替可能なものでなければならない。

或いは、上記光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置は、上記(ロ)又は(ハ)に記載の「波数の可変範囲の幅」を有する広帯域発光素子と、上記(ロ)又は(ハ)に記載の「波数の可変範囲の幅」「周波数幅」「波数間隔」及び「時間間隔」で広帯域発光素子の出力光を階段状に抽出可能な可変波長フィルタとその制御回路であっても良い。

【0041】

(2) 本発明の第二の手段

上記第一の手段は、以下の様にも表現することができる。即ち、第一の手段を別の側面から表現すると、上記課題を解決するための第二の手段は、＜可変波長光源と、前記可変波長光源の出力光を第一の光線と第二の光線に分割する手段と、第一の光線を測定対象に照射する手段と、前記測定対象によって反射された第一の光線と第二の光線を合波する手段と、前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光源の波数毎に測定する手段と、前記測定する手段によって前記波数毎に得られる前記出力光の強度の集合から第一の光線が測定対象によって反射された位置を前記測定対象の深さ方向に対して特定する手段とを有する光干渉トモグラフィ装置の前記可変波長光源として使用される可変波長発生装置であって、分解能が $80\mu\text{m}$ 以下になるように波数の可変範囲の幅を広くし、測定範囲が 10mm 以上になるように出射光の周波数幅及び波数間隔を狭くし、且つ、前記分解能を速度 1mm/s で除した第一の値を前記可変範囲の幅を前記波数間隔で除した第二の値で除して得られる時間以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有する光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置＞となる。

【0042】

ここで分解能のより好ましい値は、 $40\mu\text{m}$ 以上又は $20\mu\text{m}$ 以上である。また、測定範囲のより好ましい範囲は、 100mm 以上又は 1000mm 以上である。更に、分解能を除する速度のより好ましい範囲は、 3mm/s 又は 9mm/s である。

また、走査する測定点の数を n （例えば、 $n=10, 50, 100, 200, 400, 800$ ）以上とする場合には、波数切替時間を n 分の1以下にすれば良い。

【0043】

(3) 本発明の第三の手段

上記課題を解決するための第三の手段は、上記第一又は第二の手段の「可変波長光発生装置」を構成する発光素子として「超周期構造回折格子分布反射型半導体レーザ」（特許文献1、特許文献2、非特許文献4）を用いることである。「超周期構造回折格子分布型反射半導体レーザ」は、上記第一の手段の可変波長光発生装置に求められる要件を総て充足している。即ち、可変幅は 100nm （ $\Delta k=0.261\mu\text{m}^{-1}$ ）を超え、波数の切替時間間隔が数 ns 程度の高速応答も可能である。また、連続的な波長変化が可能であり、発振スペクトルの周波数幅は数 MHz である。

【0044】

(4) 本発明の第四の手段

上記課題を解決するための第四の手段は、＜第一乃至第三の手段の何れか1つの手段による光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置と、前記可変波長光発生装置の出力光を第一の光線と第二の光線に分割する手段と、第一の光線を測定対象に照射する手段と、前記測定対象によって反射された第一の光線と第二の光線を合波する手段と、前記合波する手段によって合波された出力光の強度を前記可変波長光発生装置の波数毎に測定する手段と、前記測定する手段によって前記波数毎に得られる前記出力光の強度の集合から第一の光線が測定対象によって反射された位置を前記測定対象の深さ方向に対して特定する手段とを有する光干渉トモグラフィ装置＞を用いることである。この光干渉トモグラフィ装置は、上記第一、第二又は第三の光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置を用いているので、上述の通り上記課題を解決することができる。

【0045】

ここで、「前記可変波長光発生装置の出力光を第一の光線と第二の光線に分割する手段と、第一の光線を測定対象に照射する手段と、前記測定対象によって反射された第一の光線と第二の光線を合波する手段」としては、種々の干渉計が考えられるが、代表的なものとしてはマイケルソン干渉計とマッハツェンダー型干渉計がある。マッハツェンダー型干渉計を用いると、集光効率がマイケルソン干渉計より高くなる。

【発明の効果】

【0046】

本発明は、可変波長光発生装置が超高速で波長切り替えが可能な光源（例えば、半導体レーザ）によって構成できることに着目し、可変波長光発生装置を用いた波数の走査によってコヒーレント干渉波形を構築することにより、従来の OCT では困難であった制止困難な生体部分の断層観察を可能にした。また、制止可能な部分の観察に対しても、制止を不要とし生体への負担を無くした断層観察が可能にした。この際、可変波数幅・波数間隔・周波数幅を限定することによって、十分な分解能と測定範囲の確保も可能とし、能率的な測定を可能にした。

【発明を実施するための最良の形態】

【0047】

<実施の形態例 1>

図 3 に本発明による光干渉トモグラフィ装置の一例を示す。

図 3 に示す光干渉トモグラフィ装置では可変波長光源として、可変波長光発生装置 31 を有している。可変波長光発生装置 31 は、超周期構造回折格子分布反射型半導体レーザとその制御回路から構成されている。可変波長光発生装置 31 の可変波長範囲は $1533.17 \sim 1574.14 \text{ nm}$ ($\text{Wk} = 1.07 \times 10^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)、スペクトルの周波数幅は 10 MHz 以下である。走査速度は 1 ステップ当たり $1 \mu\text{s}$ であり、400 波数の走査を行う（従って、1 ステップ当たりの波数幅は $2.67 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ である。）。走査速度 $1 \mu\text{s} / \text{step}$ で 400 波数の走査を行うので、A スキャン（深さ方向のみについての走査）の計測時間は 0.4 ms で、50 の A スキャンで B スキャン（A スキャンを繰り返しながら行う水平方向の測定点の走査）を構成すると計測時間は 20 ms となる。

式 (2) から静的分解能を求めると、

$$\Delta Z = 36 \mu\text{m}$$

となる（屈折率 1.36 の生体中での分解能は $26 \mu\text{m}$ である。屈折率は試料の組成に依存するので、本発明では屈折率の分解能への影響は考慮しないこととした。上記の様に生体の屈折率はそれほど大きくないので、屈折率の影響を無視しても得られる効果はほぼ同じである。）。たとえ生体試料が 1 mm/s で移動したとしても、B スキャンの間に試料の動く距離は $20 \mu\text{m}$ でしかなく静的分解能 $36 \mu\text{m}$ に比べ小さいので動的分解能に劣化は生じない。

また、測定範囲は、波数間隔により定まり、式 (4) から分かるように 12 mm である（なお、周波数幅から計算される測定範囲は 13 m である（式 (3) 参照）。）。

【0048】

可変波長光発生装置 31 から出射された光は、第一のカプラ 32 により 90:10 の割合で 2 分割される。ここで分割された光の一方（分割割合 90%）は、第二のカプラ 33 によって 70:30 の割合で更に 2 分割される。そして、ここで分割された光の一方（測定光：分割割合 70%）はオプティカルサーキュレータ 34 によって測定対象である試料 37 に導かれ、試料 37 からの信号光 45 は再びオプティカルサーキュレータ 34 によって第三のカプラ 38 に導かれる。オプティカルサーキュレータ 34 を利用することによって、マッハツェンダー型の干渉計を構築することができた。断層像を得るための B スキャンは、オプティカルサーキュレータ 34 と試料 37 との間に介設された走査ミラー 36 によって測定光を試料 37 の表面で走査することによって実現する。なお、第一、第二及び第三のカプラ 32, 33, 38 は、方向性結合器によって構成されている。第三のカプラ 38 の出力は、光検出機能を有する第一の差動アンプ 39 で検出される。第三のカプラ 38 は方向性結合器によって構成されているので、第三のカプラ 38 の 2 つ出力 I_{01} 及び I_{02} は、それぞれ以下の様になる。第一の差動アンプ 39 は、第三のカプラ 38 の 2 つの出力 I_{01} 及び I_{02} の差を検出し、その \log を出力する。式 (7) の最初の式は、光路長差が $2L$ の場合の干渉パターンを表す良く知られた式である。式 (7) の第二の式は、方向性結合器の特性によるものである。

【0049】

【数 7】

$$\left. \begin{aligned} 2I_{01} &= I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(2Lk_j) \\ 2I_{02} &= I_r + I_s - 2\sqrt{I_r I_s} \cos(2Lk_j) \end{aligned} \right\} (7)$$

【0050】

ここで k_j は可変波長光発生装置 31 の出射光の波数、 I_r は参照光 46 (第二のカプラ 33 によって分割された光のうち、オプティカルサーキュレータ 34 によって試料 37 に導かれず、直接第三のカプラ 38 に導かれるもの: 分割割合 30%) の強度、 I_s は試料 37 からの信号光 45 の強度、 $2L$ は参照光 46 と信号光 45 の光路長差 (マイケルソン干渉計では、参照光ミラーとビームスプリタの光路長を L_r 、試料内部の反射面とビームスプリタの光路長を L_s とした時、 $L = L_s - L_r$ となる。従って、 L は試料の深さ方向の座標に相当する。) を表す。また、説明を単純化するため試料 37 の内部での反射箇所は一箇所のみとし、反射に伴う位相シフトは無視した (反射に伴う位相シフトは π 以内なので光路長の誤差は二分の一波長以下であり無視しうる。))。

この第一の差動アンプ 39 の \log 出力信号を第二の差動アンプ 40 に入力する。第一のカプラ 32 で分割された光の他方 (分割割合 10%) は、光検出器 42 によって検出された後、 \log アンプ 43 を通して、第二の差動アンプ 40 に導かれる。第二の差動アンプ 40 は、入力光強度の変動を補正する割り算を行う。従って、第二の差動アンプ 40 の出力は、以下の式 (8) で表される (定数項は省略した)。

【0051】

【数 8】

$$\log \left[\sqrt{\frac{I_s}{I_r}} \cos(2Lk_j) \right] \cdots \cdots \cdots (8)$$

【0052】

第二の差動アンプ 40 の出力は、アナログ/デジタル変換機 (図示せず) に入力され、そのデジタル出力は計算機 41 に導かれ、計算機 41 で計算処理されてコヒーレント干渉波形が合成される。計算機 41 は、このコヒーレント干渉波形に基づいて試料 37 の断層像を構築する。計算機 41 は、可変波長光発生装置 31 及び走査ミラー 36 の制御も同時に行う。図 4 に、コヒーレント干渉波形を合成した例を示す。厚さ $160 \mu\text{m}$ のカバーガラスを試料 37 として得られたコヒーレント干渉波形である。二つのピークは、それぞれ試料 37 の表面及びその裏面からの反射に対応する。

このような装置構成をとることによって、従来困難であった消化器管のように制止困難な器官についても断層撮影が可能になった。

図 5 は、人の爪を測定対象として断層撮影した結果である。爪の表面から厚さ $80 \mu\text{m}$ 程度の層が 5 層識別でき、その後ろに $300 \mu\text{m}$ の厚い層が存在することが分かる。測定に際し指の固定は特段行わなかったが、ブレのない鮮明な像が得られた。

【0053】

本実施の形態例 1 では、マッハツェンダー型干渉計を使用しているので、断層像を得るためには B スキャンが必須である。しかし、集光効率が高く、また測定光を光ファイバで試料近傍まで導くことができるので、操作性に優れている。なお、ファイバ・ソース・カプラ (商品名) 35 は所謂コリメータであって、オプティカルサーキュレータ 34 と走査ミラー 36 との間に介設されており、光ファイバから出て広がる測定光を平行光にし、且つ、試料 37 からの信号光 45 (平行光) を収束して光ファイバに結合する。また、可視光源であるエイミング・ライト・ソース 44 から出力された可視光も、第二のカプラ 33、オプティカルサーキュレータ 34、ファイバ・ソース・カプラ 35 及び走査ミラー 36 を介して試料 37 へ導かれて照射される。このことによって、測定の前に試料 37 へ

の測定光の当り具合を目で確認することができる。

【0054】

可変波長光発生装置 31 の発光素子としては、超周期構造回折格子分布反射型半導体レーザーに限られるものではなく、可変波数幅は狭くなるが分布反射型レーザー (DBR レーザ) を用いることもできる。また、これら以外にも、適用可能な可変波長レーザーが存在する (例えば、特許文献 3 に記載の可変波長レーザー)。これらのレーザーの波数切換時間は、数 ns まで高速化可能である。

【0055】

(原理)

コヒーレント干渉波形を得るために行なった計算処理の原理は以下の通りのものである。

式 (8) の \log の中の項は、 I_s / I_r の平方根と \cos の項からなっている。ここで、 I_s / I_r は、 k_j 依存性が小さいので定数と考えられる。従って、第二の差動アンブ 40 の出力を計算処理し \log を外すことによって、 $\cos (2L \cdot k_j)$ に比例した出力 I_d を得ることができる。

総ての k_j について出力 I_d を測定しその値をフーリエ変換して絶対値をとると、 $x = 2L$ の位置に鋭いピークを持つ関数を得られる。即ち出力 I_d を、フーリエ変換することによって試料内部の反射面の位置を表す値 $2L$ を得ることができる。

以下に、フーリエ変換の絶対値が、 $x = 2L$ の位置に鋭いピークを持つ関数であることを示す。

出力 I_d のフーリエ変換の \cos 成分 $Y_c(x)$ 、 \sin 成分 $Y_s(x)$ 、及び絶対値 $Y_t(x)$ はそれぞれ以下の式 (9)、(10)、(11)、(12) のようになる (比例係数は省略。以下、同じ。)

【0056】

【数 9】

$$Y_c(x) = \sum_{n=1}^N \cos(k_j x) \cos(2Lk_j) \quad (9)$$

$$Y_s(x) = \sum_{n=1}^N \sin(k_j x) \cos(2Lk_j) \quad (10)$$

$$Y_t(x) = \sqrt{Y_c^2(x) + Y_s^2(x)} \quad (11)$$

$$k_j = k_s + \Delta k \cdot n \quad (12)$$

【0057】

ここで、 k_s は波数走査範囲の起点を、 n は自然数を、 N は走査する波数の総数を表す。

。

まず、 \cos 成分 $Y_c(x)$ について考える。

数学公式から以下の式 (13)、(14) が導かれる。

【0058】

【数 10】

$$\begin{aligned}\cos \alpha \cos \beta &= \frac{1}{2} [\cos (\alpha + \beta) + \cos (\alpha - \beta)] \\ &= \frac{1}{4} [e^{j(\alpha + \beta)} + e^{-j(\alpha + \beta)} + e^{j(\alpha - \beta)} + e^{-j(\alpha - \beta)}] \quad (13)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^N e^{j r n} &= \frac{1 - e^{j(N+1)r}}{1 - e^{j r}} \\ &= \frac{e^{j \frac{(N+1)r}{2}}}{e^{j \frac{r}{2}}} \cdot \frac{\frac{e^{j \frac{(N+1)r}{2}} - e^{-j \frac{(N+1)r}{2}}}{2}}{\frac{e^{j \frac{r}{2}} - e^{-j \frac{r}{2}}}{2}} \\ &= e^{j \frac{N}{2} r} \frac{\left[\sin \left(\frac{N+1}{2} r \right) \right]}{\sin \left(\frac{r}{2} \right)} \quad (14)\end{aligned}$$

【0059】

式(9)を計算する際、式(13)及び式(14)を利用する。なお、 j は虚数単位のことである。

まず、式(13)で $\alpha = k_j \times x$ 、 $\beta = 2L \times k_j$ と置き、式(9)に代入する。式(13)は4つの項からなるが、まず前2項だけについて Σ を計算する。 Σ の計算には式(14)を用いる。この際、 $\gamma = (x + 2L) \times \Delta k$ と置き、 $j \times (\alpha + \beta) = j(x + 2L) \times k_j = j(x + 2L) \times (k_s + \Delta k \cdot n) = j(x + 2L) \times k_s + j(x + 2L) \cdot \Delta k \cdot n = j(x + 2L) \times k_s + j \cdot \gamma \cdot n$ 、なる関係式を利用する。最後に $\cos(x) = (\exp(jx) + \exp(-jx)) / 2$ の関係式を用いると式が簡単になる。後ろ2項についても同様の手順を踏むと以下の式(15)が得られる。

【0060】

【数 11】

$$\begin{aligned}Y_c(x) &= \frac{1}{2} \cos \left[\frac{(x+2L)}{2} \left(k_s + \frac{N \Delta k}{2} \right) \right] \frac{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{(x-2L)}{2} \left(k_s + \frac{N \Delta k}{2} \right) \right] \frac{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \\ &\quad \dots\dots\dots (15)\end{aligned}$$

【0061】

同様に、 \sin 成分 $Y_s(x)$ も以下の式(16)の様に導かれる。

【0062】

【数 1 2】

$$Y_s(x) = \frac{1}{2} \sin \left[\frac{(x+2L)}{2} \left(k_s + \frac{N\Delta k}{2} \right) \right] \frac{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \\ + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{(x-2L)}{2} \left(k_s + \frac{N\Delta k}{2} \right) \right] \frac{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \\ \text{----- (16)}$$

【0063】

ここで式(15)及び式(16)ともに以下の式(17)、(18)の項を含むが、これらは $x = -2L$ 又は $x = 2L$ で大きな値を持ちそれ以外では小さな値となる。

【0064】

【数 1 3】

$$\frac{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x+2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \text{----- (17)}$$

$$\frac{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \text{----- (18)}$$

【0065】

一方、それらの項の係数は -1 から $+1$ の間で振動する三角関数である。従って、フーリエ変換の絶対値は、 $x = -2L$ の近傍では式(15)から式(17)の項を、 $x = 2L$ の近傍では式(16)から式(18)の項を弁別して式(11)を代入すれば近似値が得られる。

従って、 $x = 2L$ の近傍では、次の式(19)となる。

【0066】

【数 1 4】

$$Y_t(x) \propto \left| \frac{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} (N+1) \Delta k \right]}{\sin \left[\frac{(x-2L)}{2} \cdot \Delta k \right]} \right| \text{----- (19)}$$

【0067】

即ち、波数毎に得られる出力光強度の集合から測定対象内部の反射面の位置が特定される。この特定に必要な光強度は各波数に一つなので、従来の OFDR-OCT に比べ測定時間を短くすることができる。

式(19)は x についての周期関数であり、その周期は式(19)の分母の \sin 関数によって決まる(図6)。Nyquist の定理によれば、測定可能範囲 L_m は以下の式(20)、(21)で表される。

【0068】

【数 15】

$$\frac{2L_m}{2} \cdot \Delta k = \pi \quad \text{----- (20)}$$

即ち

$$L_m = \frac{\pi}{\Delta k} \quad \text{----- (21)}$$

【0069】

また、本発明の分解能も式(19)より導ける。

$\sin(x)$ は $x=0$ の近傍では x で近似できるので、 $x=2L$ における式(19)の値は $(N+1)$ であることは明らかである。従って、以下の式(22)を x について解けば、半値幅すなわち分解能 ΔZ が分かる。

【0070】

【数 16】

$$\frac{\sin\left[\frac{X}{2}(N+1)\Delta k\right]}{\sin\left[\frac{X}{2}\Delta k\right]} = \frac{N+1}{2} \quad \text{----- (22)}$$

【0071】

ここで、以下の近似式(23)を式(22)に代入し、数値解析で式(23)を解くと式(24)が得られる。

【0072】

【数 17】

$$\sin\left(\frac{X}{2}\Delta k\right) \simeq \frac{X}{2}\Delta k \quad \text{----- (23)}$$

$$\frac{X}{2}(N+1)\Delta k = 1.89549 \quad \text{----- (24)}$$

【0073】

この式より分解能に関する式(25)が得られる。

【0074】

【数 18】

$$\Delta Z = X = \frac{2 \times 1.89549}{(N+1)\Delta k} = \frac{3.79}{Wk} \quad \text{----- (25)}$$

【0075】

なお、この分解能は x については半値半幅であるが、試料の深さ方向の座標に相当する L については半値全幅となる。

【0076】

<実施の形態例 2>

本実施の形態 2 における光干渉トモグラフィ装置の構成は図 3 と同様とする。そして、本実施の形態 2 では、可変波長光発生装置 31 の可変波長範囲は $1511.74 \sim 1588.26 \text{ nm}$ ($Wk = 2.0 \times 10^{-1} \mu\text{m}$) であり、スペクトルの周波数幅は 10 MHz

以下である。走査速度は1ステップ当たり 2 ns/step であり、8000波数の走査を行う（従って、一ステップ当たりの波数幅は $2.5 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ である。）。走査速度 2 ns/step で8000波数の走査を行うので、Aスキャン（深さ方向のみについての走査）の計測時間は $16 \mu\text{s}$ で、800のAスキャンでBスキャン（Aスキャンを繰り返しながら行う水平方向の測定点の走査）を構成すると計測時間は 13 ms となる。式（2）から静的分解能を求めると

$$\Delta Z = 19 \mu\text{m}$$

となる。たとえ生体試料が 1 mm/s で移動したとしても、Bスキャンの間に試料の動く距離は $13 \mu\text{m}$ でしかなく静的分解能 $19 \mu\text{m}$ に比べ小さいので動的分解能に劣化は生じない。

【0077】

また、測定範囲は、波数間隔により定まり、式（4）から分かるように 130 mm である（なお、周波数幅から計算される測定範囲は 13 m である（式（3）参照）。）。測定範囲が 130 mm 以上と十分に広がるので測定点を変えても参照光ミラー位置をその度ごとに調整する必要がなくなる。

【0078】

上述の例では、干渉計としてマッハツェンダー干渉計を用いたが図8の従来技術のように、マイケルソン干渉計を用いても良い。即ち、図8の構成において、光源5を上記の可変波長光発生装置31に代えればよい（参照光ミラー8の移動は不要）。この場合、図10のように測定光を一軸方向にのみ集束するシリンドリカルレンズ19とCCD16とを用いることによって（図10の構成において、光源5を上記の可変波長光発生装置31に代えることによって）、Aスキャンのみによって断層像を得ることもできる（グレーティング21は不要）。

【0079】

<実施の形態例3>

本実施の形態3の光干渉トモグラフィ装置では、マイケルソン干渉計とシリンドリカルレンズにより、Aスキャンのみによって断層像を得られるように光学系を構成する。即ち、上記のように図10の構成において、光源5を可変波長光発生装置に代えた構成とする（グレーティング21は不要）。そして、本実施の形態3では、可変波長光発生装置の可変波長範囲は $1511.74 \sim 1588.26 \text{ nm}$ ($\text{Wk} = 2.0 \times 10^{-1} \mu\text{m}$)、スペクトルの周波数幅は 10 MHz 以下にする。走査速度は1ステップ当たり 25 ns/step であり、80000波数の走査を行う（従って、一ステップ当たりの波数幅は $2.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ である。）。走査速度 25 ns/step で80000波数の走査を行うので、計測時間（Aスキャンの測定時間）は 2.0 ms となる。式（2）から静的分解能を求めると

$$\Delta Z = 19 \mu\text{m}$$

となる。たとえ生体試料が 9 mm/s で移動したとしても、測定時間に試料の動く距離は $18 \mu\text{m}$ でしかなく静的分解能 $19 \mu\text{m}$ に比べ小さいので動的分解能に劣化は生じない。

【0080】

また、測定範囲は、波数間隔により定まり、式（4）から分かるように 1300 mm である（なお、周波数幅から計算される測定範囲は 13 m である（式（3）参照）。）。測定範囲が 1300 mm 以上と十分に広がるので測定点を変えても参照光ミラー位置をその度ごとに調整する必要がなくなる。

【0081】

なお、可変波長光発生装置の可変波数幅・波数間隔等について三つだけ例を示したが、可能な可変波数幅・波数間隔等の組み合わせはこれに限られるものではない。「課題を解決するための手段」の欄に列挙した組み合わせを用いることによっても、この例と同様又はより大きな効果が奏される。

【0082】

また、上記光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置は、スーパー・ルミネッセンス

・ダイオード (S L D) やハロゲンランプ等の広帯域発光素子とその出力光を階段状に抽出する可変波長フィルタ (特許文献 2 に記載の導波型ファブリ・ペロー光波長フィルタ、エタロン等) とその制御回路であっても良い。

【産業上の利用可能性】

【0083】

この発明は、光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置及び光干渉トモグラフィ装置に関するものであり、特に従来の OCT では困難であった制止困難な生体部分の断層観察を行う場合に適用して有用なものであり、また、制止可能な部分の断層観察を行う場合に適用しても有用なものである。

【図面の簡単な説明】

【0084】

【図 1】 本発明の光干渉トモグラフィ用の可変波長光発生装置において波数を階段状に切り替える様子を示す図である。

【図 2】 各波数における干渉計の出力光強度を束ねた分光特性を示す図である。

【図 3】 本発明による光干渉トモグラフィ装置の構成例を示す図である。

【図 4】 前記光干渉トモグラフィ装置においてコヒーレント干渉波形を合成した例を示す図である。

【図 5】 人の爪を測定対象として断層撮影した結果を示す図である。

【図 6】 測定可能範囲の説明図である。

【図 7】 O C D R - O C T の測定原理である。

【図 8】 O C D R - O C T 装置の構成図ある。

【図 9】 前記 O C D R - O C T 装置において得られる干渉パターン (コヒーレント干渉波形) を示す図である。

【図 10】 O F D R - O C T 装置の構成図である。

【図 11】 前記で O F D R - O C T 装置において得られるフリンジ (空間的な干渉模様) を示す図ある。

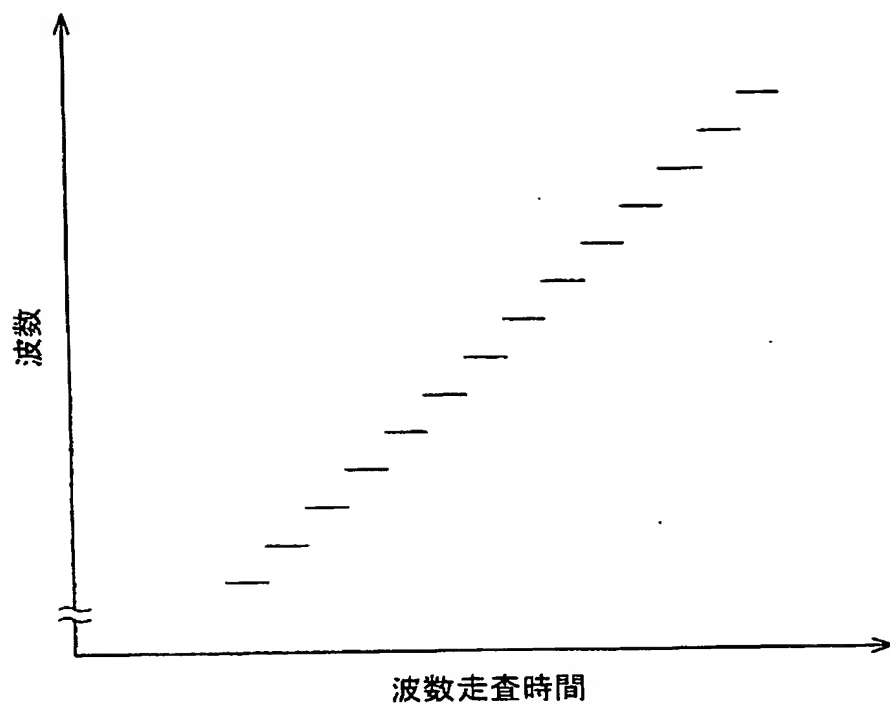
【符号の説明】

【0085】

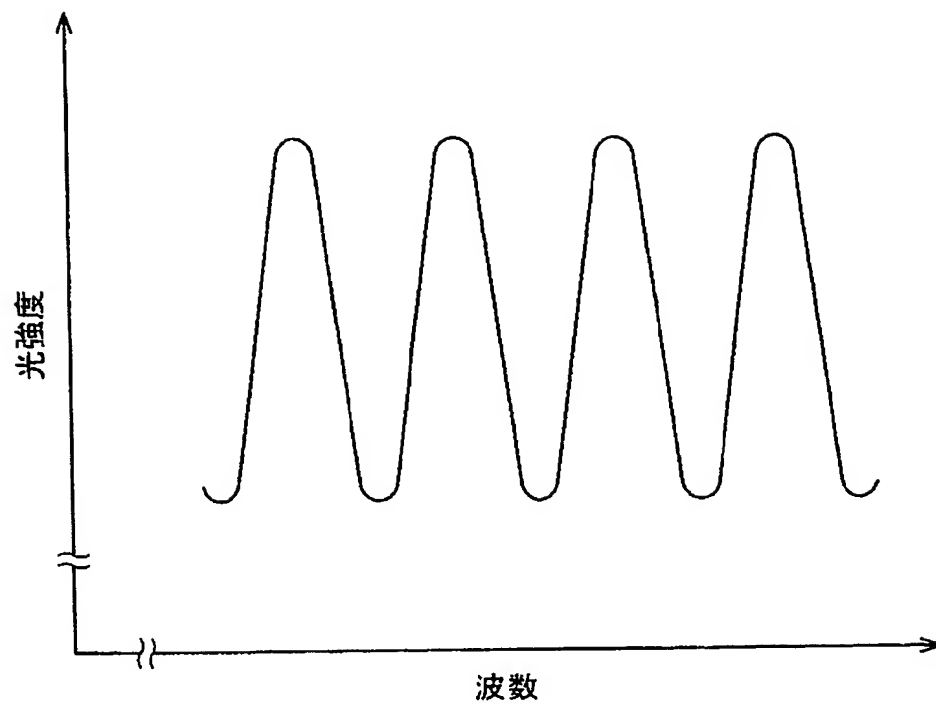
- 1 試料 (生体)
- 2 測定光
- 3 組織境界面
- 4 反射光
- 5 光源
- 6 マイケルソン干渉計
- 7 ビームスプリッタ
- 8 参照光ミラー
- 9 光検出器
- 10 参照光
- 11 信号光
- 12 検出器の出力
- 13 参照光ミラーの移動距離
- 14 光路長が一致した付近
- 15 干渉パターン
- 16 C C D
- 17 試料表面
- 18 測定光
- 19, 20 シリンドリカルレンズ
- 21 グレーテイング
- 22 フリンジ
- 31 可変波長光発生装置

- 32 第一のカプラ
- 33 第二のカプラ
- 34 オプティカルサーキュレータ
- 35 ファイバ・ソース・カプラ
- 36 走査ミラー
- 37 試料
- 38 第三のカプラ
- 39 第一の差動アンプ
- 40 第二の差動アンプ
- 41 計算機
- 42 光検出器
- 43 Log アンプ
- 44 エイミング・ライト・ソース
- 45 信号光
- 46 参照光
- 47 光ファイバ

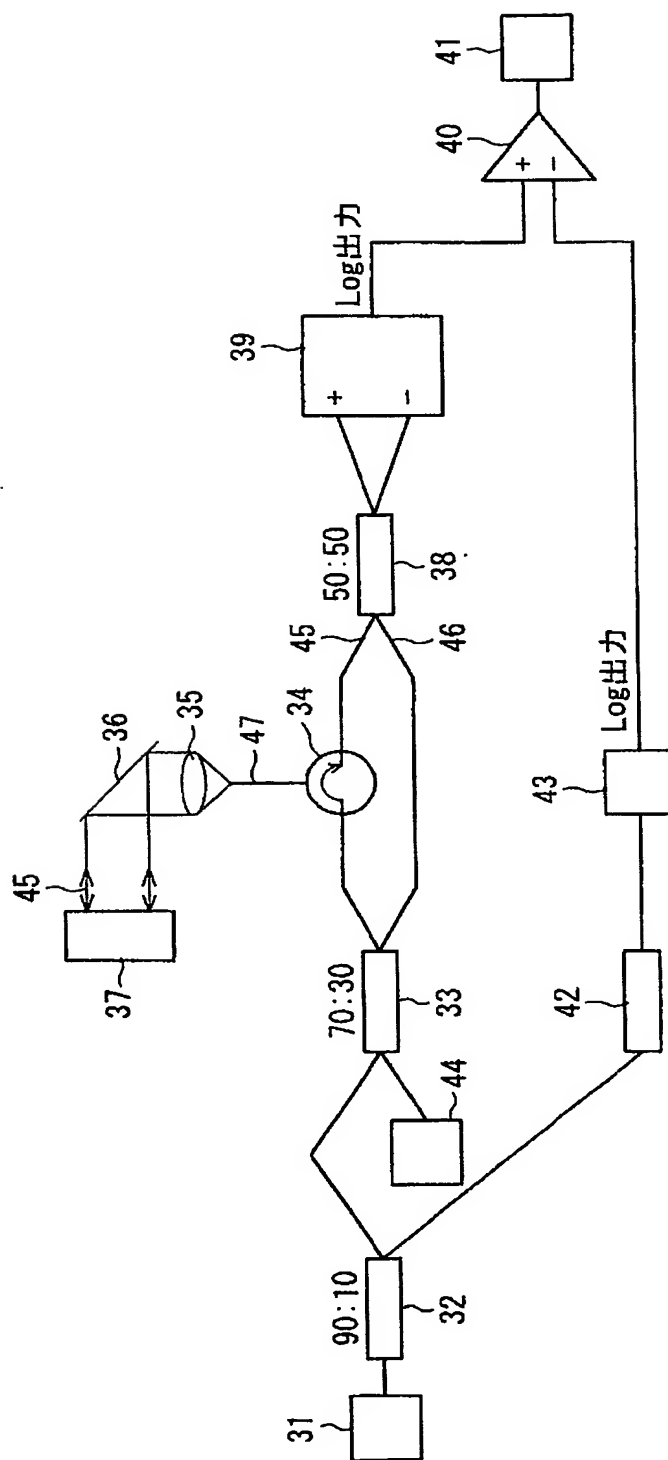
【書類名】図面
【図1】



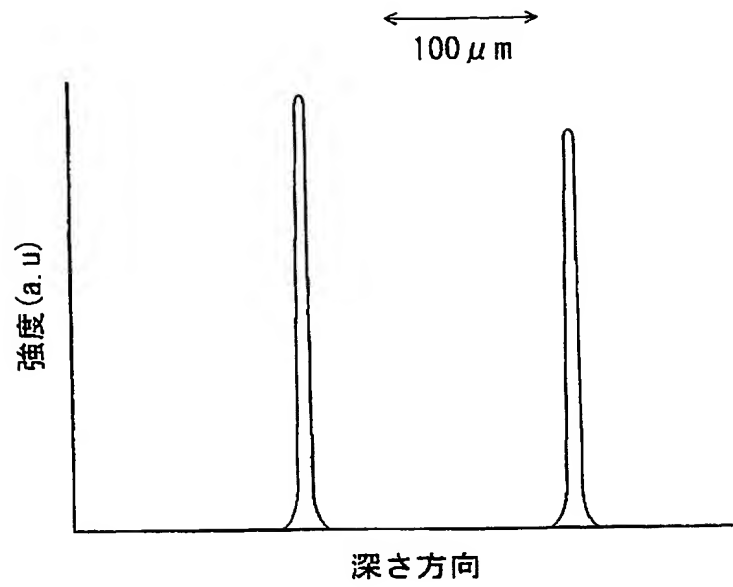
【図 2】



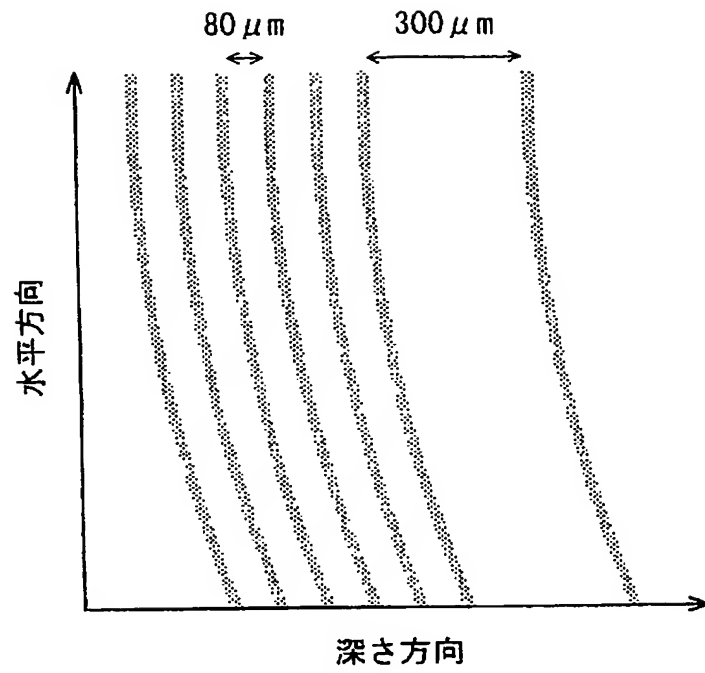
【図 3】



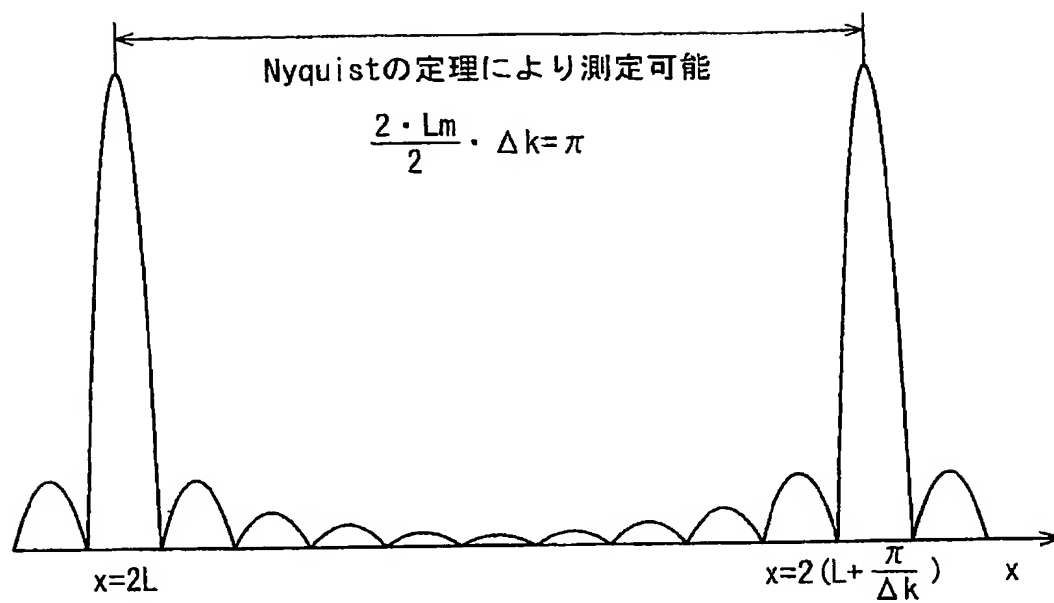
【図 4】



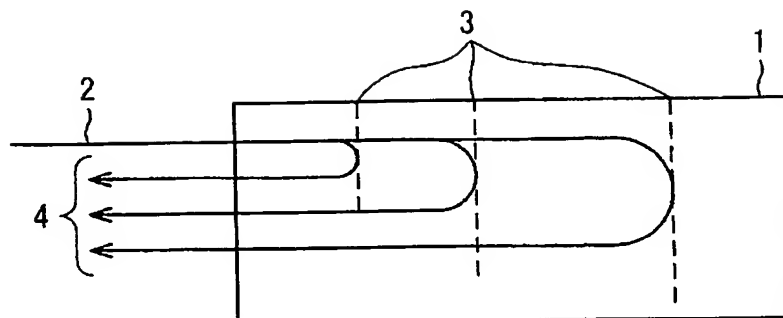
【図 5】



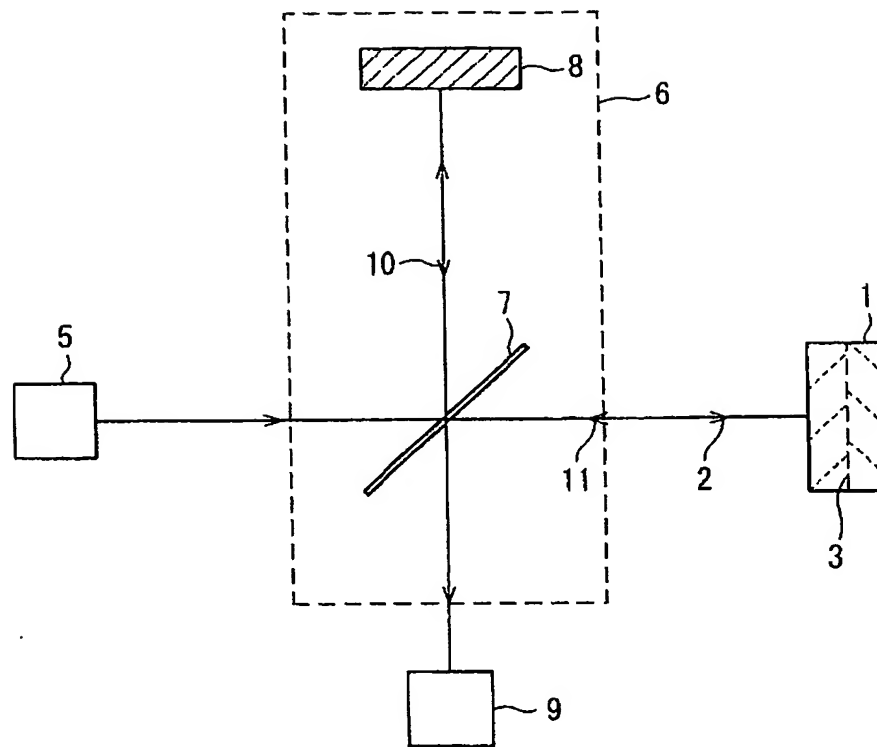
【図 6】



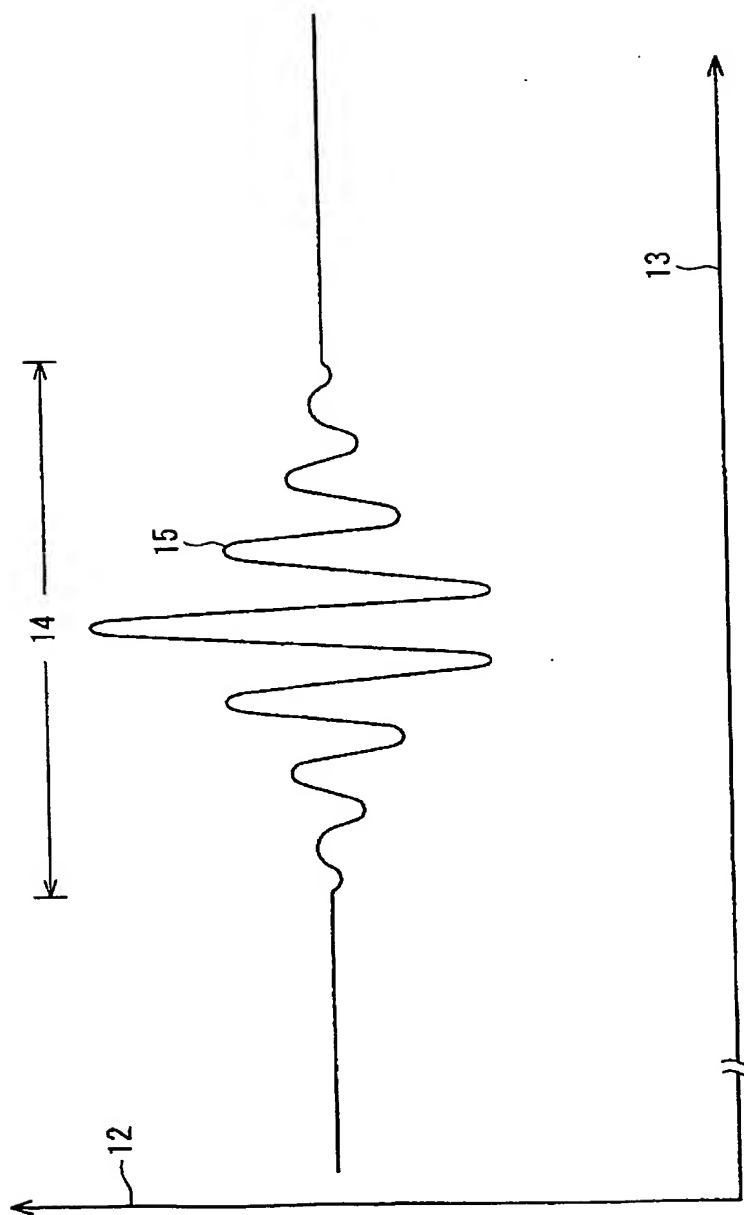
【図 7】



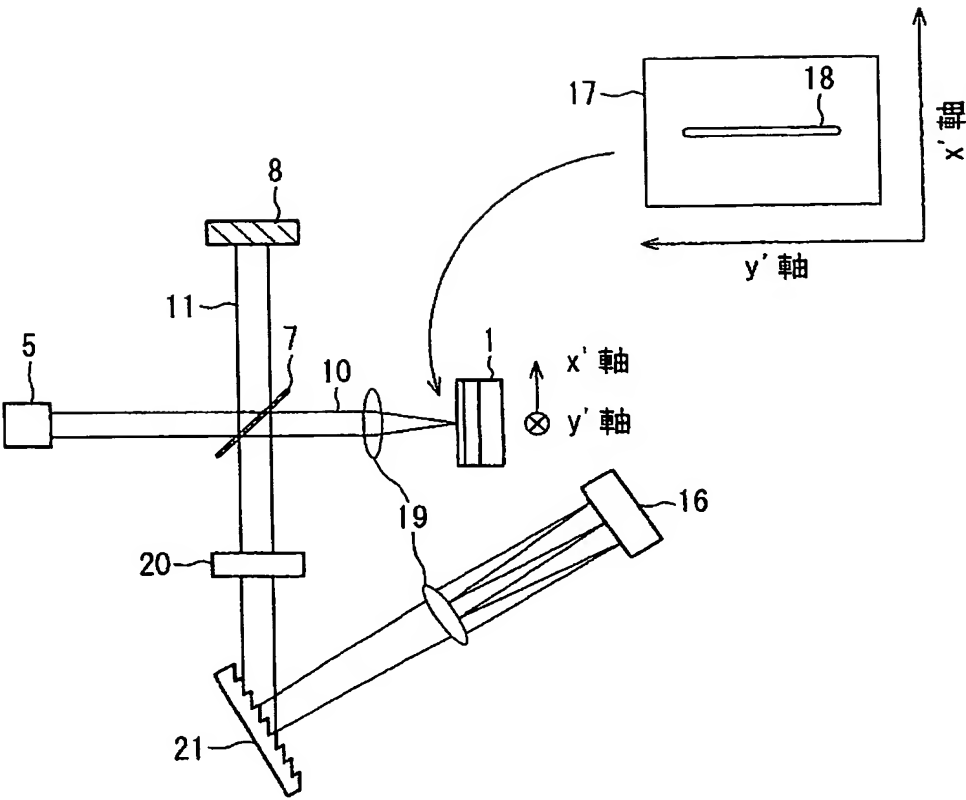
【図 8】



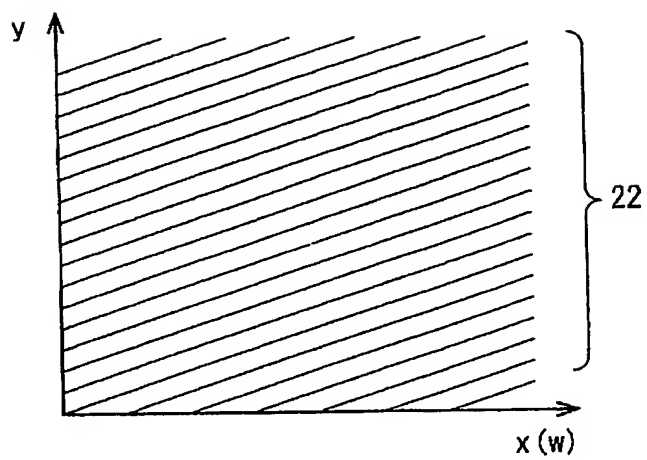
【図 9】



【図 10】



【図 11】



【書類名】要約書

【要約】

【課題】 制止困難な生体部分の断層観察を可能にする OCT 技術を提供し、また、制止可能な部分の観察に対しても、制止を不要とし生体への負担を無くした断層観察技術を提供する。

【解決手段】 光干渉トモグラフィ装置の光源として、可変波長光発生装置（可変波長高原）を用いる。この可変波長光発生装置は、例えば波数の可変範囲の幅が $4.7 \times 10^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ 以上且つ出射光の周波数幅が 13 GHz 以下であって、 $3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$ 以下の波数間隔且つ $530 \mu\text{s}$ 以下の時間間隔で波数を階段状に切り替え可能な手段を有するものとする。

【選択図】 図 1

【書類名】 出願人名義変更届
【整理番号】 KU0001
【あて先】 特許庁長官殿
【事件の表示】
 【出願番号】 特願2003-335207
【承継人】
 【識別番号】 598041566
 【氏名又は名称】 学校法人北里学園
【承継人代理人】
 【識別番号】 100085419
 【弁理士】
 【氏名又は名称】 大垣 孝
【譲渡人】
 【識別番号】 592048877
 【氏名又は名称】 清水 公也
【譲渡人】
 【識別番号】 502422432
 【氏名又は名称】 大林 康二
【手数料の表示】
 【予納台帳番号】 012715
 【納付金額】 4,200円

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2003-335207
受付番号	50401567176
書類名	出願人名義変更届
担当官	滝澤 茂世 7299
作成日	平成16年11月11日

<認定情報・付加情報>

【提出日】	平成16年 9月15日
【承継人】	
【識別番号】	598041566
【住所又は居所】	東京都港区白金5丁目9番1号
【氏名又は名称】	学校法人北里学園
【承継人代理人】	申請人
【識別番号】	100085419
【住所又は居所】	東京都豊島区東池袋1丁目35番3号 池袋センタービル4階
【氏名又は名称】	大垣 孝
【譲渡人】	
【識別番号】	592048877
【住所又は居所】	東京都武蔵野市西久保1-44-5
【氏名又は名称】	清水 公也
【譲渡人】	
【識別番号】	502422432
【住所又は居所】	千葉県佐倉市染井野2丁目23番9号
【氏名又は名称】	大林 康二

特願 2 0 0 3 - 3 3 5 2 0 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 4 2 2 6]

1. 変更年月日

1 9 9 9 年 7 月 1 5 日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号

氏 名

日本電信電話株式会社

特願 2 0 0 3 - 3 3 5 2 0 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[5 9 2 0 4 8 8 7 7]

1 . 変更年月日

1 9 9 5 年 1 2 月 7 日

[変更理由]

住所変更

住 所

東京都武蔵野市西久保 1 - 4 4 - 5

氏 名

清水 公也

特願 2 0 0 3 - 3 3 5 2 0 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[5 0 2 4 2 2 4 3 2]

1. 変更年月日

2 0 0 2 年 1 1 月 2 1 日

[変更理由]

新規登録

住 所

千葉県佐倉市染井野 2 丁目 2 3 番 9 号

氏 名

大林 康二

特願 2 0 0 3 - 3 3 5 2 0 7

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[5 9 8 0 4 1 5 6 6]

1. 変更年月日

1 9 9 8 年 3 月 3 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都港区白金5丁目9番1号

氏 名

学校法人北里学園

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.